

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Hodnocení provozní spolehlivosti trakčního systému elektrické jednotky

Evaluation of Operational Reliability of Traction System of Electrical Unit

Student:

Janek Jaromír

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Famfulík Jan, Ph.D.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaromír Janek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: **Hodnocení provozní spolehlivosti trakčního systému elektrické jednotky**
Evaluation of Operational Reliability of Traction System of Electrical Unit
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je kvantitativní a kvalitativní analýza spolehlivosti trakčního systému vybrané jednotky dle návrhu společnosti Siemens.

Postup řešení:

1. Popis trakčního systému elektrické jednotky a jeho prvků.
2. Popis metod a nástrojů pro analýzu spolehlivosti.
3. Analýza poruchových stavů a jejich následků u jednotlivých prvků trakčního systému s využitím FMEA.
4. Hodnocení provozní spolehlivosti s využitím FTA analýzy.

Seznam doporučené odborné literatury:

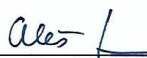
FAMFULÍK, J., HRANOŠ, V., KRZYŽANEK, R., GALVASOVÁ, Z. Spolehlivost pozemní dopravy [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2013 [cit. 2017-02-05]. ISBN 978-80-248-3266-1. Dostupné z: https://issuu.com/michdor/docs/m11_text.

Famfulík, J. Teorie údržby. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1029-8.
Podklady společnosti Siemens.

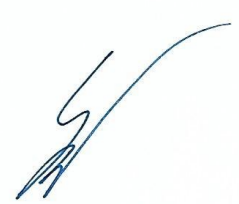
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018
Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:20.5. 2019.....

..........

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou^{*)} práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou^{*)} práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské^{*)} práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská^{*)} práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:20.5.2019.....

..........

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jaromír Janek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Mitrovická 210/237, Stará Bělá, Ostrava 724 00

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Janek, J. *Hodnocení provozní spolehlivosti trakčního systému elektrické jednotky:*
bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2019
Vedoucí: Famfulík, J.

Bakalářská práce se zabývá zhodnocením provozní spolehlivosti trakční jednotky od společnosti Siemens v zadaných provozních režimech. Určení parametrů spolehlivosti bude provedeno za pomoci FMEA a FTA metod. Výstupem práce bude vyhodnocení spolehlivosti jednotlivých druhů systémů a jejich četnost poruch.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Janek, J. *Evaluation of Operational Reliability of Traction System of Electrical Unit:*
Bachelor Thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering,
Institute of Transportation, 2019. Thesis head: Famfulík, J.

The bachelor thesis deals with the evaluation of the operational reliability of the traction unit from Siemens in the specified operating modes. Determination of reliability parameters will be done using FMEA and FTA method. The output of this thesis will be the evaluation of reliability of individual types of systems and their frequency of failures.

Obsah

1.	Úvod.....	8
1.1	Charakteristika a výhody elektrické trakční jednotky	8
1.2	Rozdělení elektrických trakčních jednotek	9
1.3	Rozdělení trakce	9
1.4	Trakční ústrojí elektrické trakční jednotky	10
1.5	Komponenty trakčního systému jednotky Desiro HC:	12
2.	Metody a nástroje pro analýzu spolehlivosti	14
2.1	Rozdělení spojitých náhodných veličin	15
2.1.1	Poissonovo rozdělení.....	16
2.1.2	Exponenciální rozdělení	17
2.2	Metoda analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA.....	19
2.3	Metoda analýzy spolehlivosti FTA	20
3.	Hodnocení bezporuchovosti trakčního systému	21
3.1	Specifikace vozidla.....	21
3.1.2	Trakční schéma	22
3.2	Hodnocení spolehlivosti s využitím FMEA.....	23
3.3	Analýza bezporuchovosti s využitím FTA	29
3.3.2	Ztráta 50 % trakčního výkonu.....	34
3.3.3	Ztráta 100 % trakčního výkonu.....	39
3.3.4	Poruchový stav zablokovaného pohonu	41
4.	Závěr.....	43
	Seznam použitých obrázků.....	47
	Seznam použité literatury.....	48

Seznam použitých zkratek

ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
FMEA	Analýza způsobů a důsledků poruch
FTA	Analýza stromu poruchových stavů
FIT	Počet poruch za 10^9 hodin

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je hodnocení provozní spolehlivosti trakčního systému elektrické jednotky na základě zadání provozních režimů. Hodnocení bude provedeno s jednotkou vyvinutou společností Siemens, která bude dále popsána a specifikována.

V teoretické části budu obecně popisovat rozdělení a účel elektrických trakčních jednotek. Popíšu systém elektrické jednotky a její prvky. Následně blíže specifikuji konkrétní komponenty a systém zadané trakční jednotky. Pak specifikuji spolehlivostní analýzu způsobů a důsledků poruch FMEA a analýzu stromu poruchových stavů FTA se zaměřením na vybrané metody.

V praktické části provedu kompletní analýzu poruchových stavů a jejich následků u jednotlivých prvků trakční jednotky na základě analýzy FMEA. Dále s touto analýzou prvků proběhne výpočet spolehlivosti jednotlivých funkčních režimů a vytvoření stromů poruch trakční jednotky s využitím metody FTA.

V závěru mé bakalářské práce vyhodnotím dosaženou spolehlivost trakční jednotky v daných jízdních režimech.

1.1 Charakteristika a výhody elektrické trakční jednotky

Dopravci v železniční dopravě v dnešní době významně uplatňují elektrické trakční jednotky, které nahrazují starší konvenční soupravy. Jednotka je svěšená skupina hnaných a hnaných železničních vozů. Hnací vozy jsou na obou koncích vlaku a jsou osazeny pouze kabinou pro obsluhu nebo i pasažéry. Mezi tyto čelní vozy se vkládají hnané, takzvané vložené vozy.

Jejich významnou výhodou je, že se nemusí v obrátových stanicích přepřahat hnací vozidlo a tím se výrazně zkrátí pobyty na koleji. To umožňuje významnou úsporu energie a snížení technologických časů v případě, kdy je nutné změnit směr jízdy pro daný spoj. [1]

Další výhodou může být zařazení více hnacích vozidel o nižším výkonu než jedna hnací lokomotiva se stejným počtem vozů. Tímto dosáhneme zmenšení nápravové tíhy hnacích vozidel a zvětšení adhezní síly jednotky. Jednotky můžeme při jejich výrobě přizpůsobit požadavkům zákazníka pro co nejlepší využití míst a prostoru. [1]

1.2 Rozdělení elektrických trakčních jednotek

Podle způsobu využití:

- Regionální – tyto jednotky umožní oproti klasické soupravě s lokomotivou snížení spotřeby energie a zvýší zrychlení díky způsobu pohonu a rozložení hmotnosti mezi vozy. Regionální jednotky jsou navrženy zejména k rychlému nástupu a výstupu cestujících. [2] Jelikož je pobyt pasažérů v těchto jednotkách krátkodobý, musí být interiér přizpůsoben k přepravě co největšího počtu osob. Zástupci regionálních trakčních jednotek jsou například jednotky typu Desiro od společnosti Siemens s.r.o.
- Příměstské – musí splňovat vyšší komfort cestujících, neboť cestující tráví v těchto vlacích i několik hodin. Tomuto požadavku musí být přizpůsoben interiér vozidel. Jedná se o tlakotěsnost, možnost občerstvení, větší prostor pro cestující nebo příjemné osvětlení. [2] Z důvodu menšího počtu nástupů a výstupů cestujících během jízdy postačí menší dveře, které nejsou v prostoru pro cestující, ale ve vyhrazeném nástupním prostoru.
- Vysokorychlostní – jsou jednotky, které splňují mnohem přísnější bezpečnostní podmínky oproti vozidlům konvenčním. Tato vozidla využívají ke svému pohybu pouze vysokorychlostní tratě bez úrovnových přejezdů. Je zde kladen velký důraz na aerodynamiku vozidel, protože vozidla mohou dosahovat rychlostí více než 500 km/h. [3] Zástupcem těchto jednotek je například vozidlo s názvem Velaro od společnosti Siemens s.r.o.

1.3 Rozdělení trakce

Hlavním znakem elektrické trakce je použití trakčního elektromotoru k pohonu hnacích kol vozidla. Rozlišujeme trakci na: [4]

- Závislou – elektrická energie se přivádí přívodním vedením ze stacionárního zdroje. Tato trakce usnadňuje konstrukční řešení a hospodárnou výrobu vozidel. Elektrická energie je přiváděna nadzemním, pozemním nebo podzemním vedením.
- Nezávislou – zásobu elektrické energie si hnací vozidlo veze s sebou, a proto je zásoba energie velmi omezena.

1.4 Trakční ústrojí elektrické trakční jednotky

Komponenty trakčního ústrojí:

- Sběrač proudu
- Hlavní vypínač
- Transformátor
- Trakční motor
- Trakční měnič

Sběrač proudu

Sběrače proudu trakčních vozidel jsou přístroje zajišťující odběr elektrické energie z trakčního vedení a přivádí ho do vozidla. [5] Konstrukce a pracovní podmínky sběračů jsou dány vzájemnou polohou, vzájemnými pohyby nebo velikostí proudu a napětí.

Rozdělení sběračů

Podle polohy a provedení trakčního vedení: [5]

- Trolejové – pro vrchní trakční vedení
- Kolejové – pro přívod izolovanou koleji

Podle tvaru mechanismu: [5]

- Jednoramenné – tyčové a lyrové
- Dvouramenné – pantografové, symetrické, asymetrické
- Nůžkové

Podle tvaru sběradla: [5]

- Se sběradlem valivým – pomocí kladky nebo kontaktního válce
- Se sběradlem smykovým – pomocí botky, smyčce nebo ližinou.

Hlavní vypínač

Hlavní vypínač někdy nazýván také jako nadproudový vypínač či rychlovypínač je výkonový vypínač zařazený v hlavním přívodním vedení vozidla, který je určen k rychlému a samočinnému vypnutí elektrických obvodů vozidla. Hlavní vypínač působí v místě styku části energetického obvodu umístěné na vozidle s napájecí soustavou. Je umístěn za sběračem proudu a bleskojistkou a uzemňovačem. Vypínací mechanismus musí obsahovat vlastní vybavovací zařízení, které způsobí vypnutí hlavního vypínače při zkratech, i kdyby některá

z ochran silnoproudého obvodu vozidla pro svou poruchu nezapůsobila. Zařízení hlavního vypínače musí dovolit spolehlivý průtok maximálních přípustných hodnot proudu do silnoproudého obvodu vozidla. [4]

Transformátor

je elektrické zařízení, které přiváděné napětí mění na napětí požadované pro pohon elektromotorů a jiných zařízení na lokomotivě. Jeho hlavní části jsou magnetický obvod, vinutí a chlazení. Podle proudu dělíme transformátory na jednofázové a třífázové. U trakčních vozidel se používají výhradně jednofázové. [6] Využívá různých druhů chlazení, například pomocí olejového okruhu, vodního okruhu nebo pomocí nasávání vzduchu z ovzduší.

Trakční motor

je pohonný stroj hnacích vozidel elektrické trakce, kterým se buď přímo nebo prostřednictvím převodu pohání hnací nápravy. Výkon a charakteristiky otáček či momentů určují trakční vlastnosti a jeho konstrukční řešení spolu s převodovou soustavou jsou rozhodující pro mechanickou koncepci vozidla. Pro rozdělení trakčních motorů jsou hlavní charakteristiky motorů, které vyjadřují závislost kroutícího momentu a otáček na proudu motoru při stálém svorkovém napětí. [5]

Dělení trakčních motorů

Podle polohy uložení ve vozidle: [5]

- Pevně v rámu vozidla
- Pevně v podvozku vozidla
- Volně v podvozku vozidla

Podle zapojení: [6]

- Stejnosměrné – sériové, cize buzené
- Střídavé – jednofázové, třífázové, synchronní, asynchronní, komutátorové
- Univerzální – pracují na stejnosměrný i střídavý proud

Trakční motory produkují spoustu tepla a je nutno, aby byly dostatečně chlazeny s vlastní nebo cizí ventilací. Motory s vlastní ventilací používají ventilátor, který je spojen s motorem pomocí hřídele. Cizí ventilace vede vzduch pomocí tunelů ze střechy skrz strojovnu.

Trakční měnič

je elektrické zařízení sloužící k regulaci výkonu. Říká se mu také pulzní měnič, jelikož pracuje na bázi elektrických pulzů. Slouží hlavně k menším ztrátám a plynulé regulaci výkonu. Na jednotkách, popřípadě lokomotivách jsou namontovány i jiné měniče pro pomocné pohony či elektrodynamickou brzdu. [6] Trakční měniče jsou nejčastěji chlazeny vzduchem nebo olejem.

1.5 Komponenty trakčního systému jednotky Desiro HC:



Obrázek 1 Regionální jednotka Desiro HC od výrobce Siemens s.r.o. [2]

Sběrač

Jednotka je vybavena dvěma sběrači, které jsou navrženy pro maximální rychlost 160 km/h. Při jízdě je aktivní pouze jeden sběrač na celou jednotku. Šířka sběrače je 1950 mm. Sběrače jsou jednoramenné ovládané pneumatickým zařízením s monitorováním kontaktních pásů a automatickým rychlým spouštěcím zařízením. Mají samostatnou vzduchovou nádrž a jsou připojeny k hlavnímu potrubí vzduchového zásobníku přes zpětný ventil. Řidič ovládá zdvihání a spouštění sběrače vlaku z kabiny řidiče přes spínač na stole řidiče. Poloha každého sběrače je označena na terminálu v kabině řidiče. [7]

Hlavní vypínač

Hlavní vypínač je střídavý vakuový spínač ovládaný stlačeným vzduchem, který je konstruován pro jmenovitý proud 750 A. Funkce hlavního vypínače je elektrické oddělení (zapínání a vypínání) systému napájení jednotky z napájecí sítě. V této trakční jednotce je hlavní vypínač vybaven spolu s uzemňovačem. [7]

Transformátor

Hlavní transformátory přeměňují vysoké napětí trolejového systému na vstupní napětí požadované pro jednotlivé komponenty. Hlavní transformátor je navržen jako 25 kV jednofázový transformátor, který je pružně připevněn ke střeše vozidla. Transformátory mají čtyři vinutí pro kompaktní měniče. Kromě toho je poskytnut filtr pro zmírnění zpětné vazby v síti. [7]

Chlazení

Trakční chladicí systém se skládá ze 2 chladicích okruhů. Z olejového okruhu pro chlazení hlavního transformátoru a vodního okruhu pro chlazení kompaktního měniče.

Trakční chladicí systém je samonosný modul, který je upevněn na střeše vozidla tak, aby se zabránilo přenášení vibrací od karoserie. Chladicí vzduch se nasává přes mřížky na bocích střechy, proudí přes výměníky tepla a je vyfukován směrem nahoru ve středu vozidla. Přívod vzduchu je umístěn ve střešním prostoru, což spolehlivě zabraňuje poškození funkcí v důsledku kontaminace (prach, pyl, listy apod.) nebo v důsledku nahromadění tepla na trati. Čerpadla a ventilátory pro výměnu pólů trakčního chladicího systému jsou provozovány elektricky. V závislosti na zatížení mohou být řízeny pro snížení hluku. [7]

Trakční motor a převodovka

Elektrický trakční motor je třífázový asynchronní motor o maximálním výkonu 600 kW. Celkový výkon motorů na jednu trakční jednotu může dosahovat až 4800 kW. Tento typ motoru vyniká svou robustností a minimálními požadavky na údržbu. Intervaly údržby pro trakční motor a ložiska jsou více než 1,5 milionu km. Trakční motory jsou chlazeny vzduchem a jejich vzduchové vedení je navrženo tak, aby bylo vyloučeno poškození funkce vnějšími vlivy. [7]

Tato jednotka používá jednostupňovou převodovku s čelním ozubením uloženou na podvozku pomocí dvou ložisek a na rámu pomocí podpěr. Převodovka je utěsněna na vnější straně bezkontaktním labyrintovým těsněním. Ložiska a ozubení převodovky jsou mazány olejem. [7]

Trakční měnič

Jednotka desiro HC používá vodou chlazený trakční měnič pro napájení trakčního systému instalován na střeše vozidla. Každý pulzně řízený trakční měnič dodává energii jednomu pohonnému systému, který dodává hnací sílu pouze jednomu podvozku. Elektrodynamické brzdění bez opotřebení umožňuje přivádění zpětné brzděné energie do trolejového systému. [7]

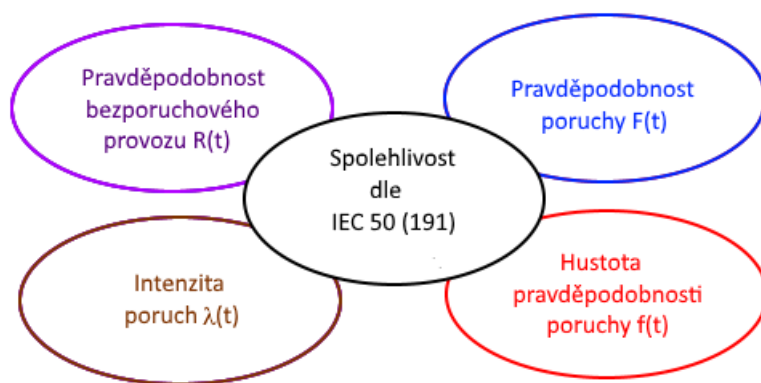
2. Metody a nástroje pro analýzu spolehlivosti

Spolehlivost je definována jako souhrnný termín, používaný pro popis pohotovosti a faktorů, které ji ovlivňují. Spolehlivost chápeme jako celkovou vlastnost tělesa, např. vozidla. Spolehlivost můžeme v rozsáhlejší pojetí podle normy ČSN EN ISO 9000:2006 rozdělit do těchto tří částí. [8]

- Bezporuchovost – je schopnost objektu plnit požadované funkce za daných podmínek a v daném časovém období
- Udržovatelnost – je schopnost objektu v požadovaných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci tehdy, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy i prostředky
- Zajištěnost údržby – je schopnost organizace poskytovat údržbářské služby dle požadavků v daných podmínkách pomocí prostředků, které jsou potřebné pro údržbu v souladu s koncepcí údržby [8]

Spolehlivost je úzce vyjádřena dle ČSN IEC 50 (191) jako pravděpodobnost bezporuchového provozu. [8] To znamená, že objekt může plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu. Tato norma definuje další pojmy vztahující se k bezporuchovosti a údržbě: [8]

- Porucha – znamená částečnou nebo úplnou ztrátu schopnosti provozu soustavy nebo prvku. Podle stanovených podmínek provozu se dále rozhodujeme, zda jde o poruchu nebo ne, pokud dojde ke změně schopnosti provozu
- Doba do první poruchy – celková doba provozu objektu od okamžiku prvního uvedení do použitelného stavu až do poruchy
- Doba mezi poruchami – doba mezi dvěma po sobě následujícími poruchami opravovaného objektu
- Doba údržby – časový interval, během kterého se na objektu provádí údržbářský zásah buď ručně nebo automaticky, včetně technických a logistických zpoždění
- Údržba – souhrn konkrétních technologických činností a postupů, jejímž uplatňováním za určených podmínek se provádí obnova technického stavu objektu
- Preventivní údržba – údržba prováděná v daných intervalech, nebo podle předepsaných kritérií a jejím účelem je snížení pravděpodobnosti poruchy, nebo degradace fungování objektu
- Údržba po poruše – údržba prováděná po zjištění poruchového stavu a jejím účelem je uvedení objektu do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci
- Oprava – je část údržby po poruše, při níž se na objektu provádějí ruční operace.



Obrázek 2 užší pojetí spolehlivosti [8]

2.1 Rozdělení spojitých náhodných veličin

Ve spolehlivosti je vznik poruch posuzován nejčastěji ve vztahu k době provozu objektu nebo za ujetou dráhu objektu. Doba do poruchy představuje spojitou náhodnou veličinu, protože může nabývat libovolné hodnoty z intervalu $(0; \infty)$. Rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny popisuje distribuční funkce, resp. hustota pravděpodobnosti. [8]

2.1.1 Poissonovo rozdělení

Poissonovo rozdělení používáme pro popis pravděpodobnosti výskytu náhodných jevů během stanoveného časového intervalu. Toto rozdělení je možno použít za předpokladu že:

- pravděpodobnost, že vzniknou dvě události současně je nulová
- události se vyskytují nezávisle na sobě
- intenzita výskytu náhodného jevu je neměnná během celého intervalu

Pravděpodobnost, že během stanoveného časového intervalu se sledovaný jev vyskytne k krát je dána touto funkcí $p(k)$: [8]

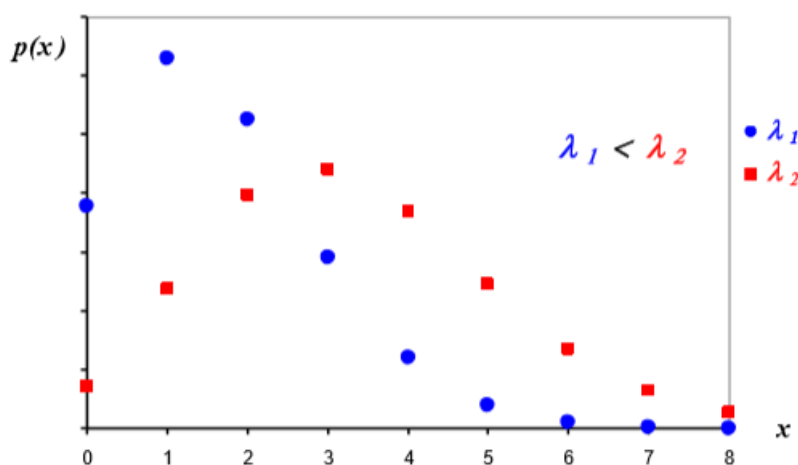
$$p(k) = P(X = k) = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.1)$$

Kde:

λ – intenzita náhodného jevu [h^{-1}], λ = konstanta

k – počet výskytů sledovaného jevu

t – délka časového intervalu [h]

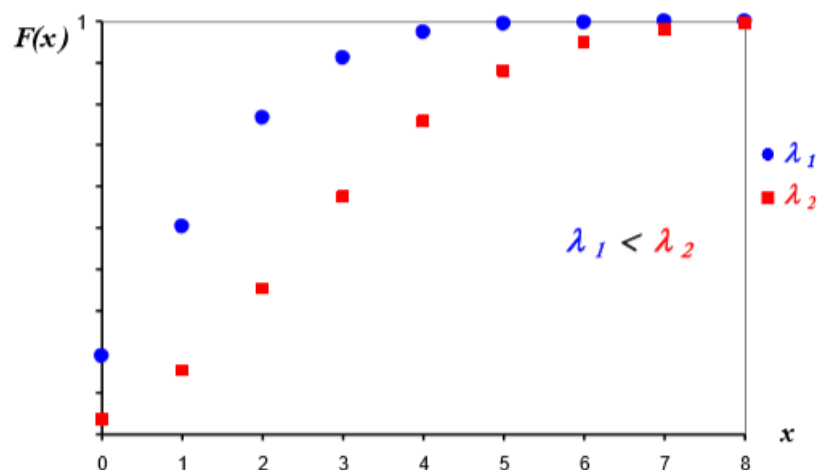


Obrázek 3 pravděpodobnostní funkce pro odlišné hodnoty [8]

Distribuční funkce Poissonova rozdělení $F(k)$ je dána následujícím vztahem:

$$F(k) = P(X \leq a) = \sum_{k=0}^a \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.2)$$

Graf distribuční funkce Poissonova rozdělení pro různé hodnoty intenzity poruch vypadá takto:



Obrázek 4 Distribuční funkce pro různé hodnoty [8]

Střední hodnotu $E(X)$, a rozptyl $D(X)$ poissonova rozdělení jsou dány podle následujících vzorců.

$$E(X) = \lambda \cdot t \quad (2.3)$$

$$D(X) = \lambda \cdot t \quad (2.4)$$

V praktických příkladech, kdy se využívá Poissonovo rozdělení ve spolehlivosti se určuje pravděpodobnost, že se u zařízení v určitém časovém intervalu vyskytne nejméně jedna porucha. V takovém případě se využívá přístupu založeném na opačném jevu, tedy:

$$P(X \geq 1) = 1 - P(X = 0) \quad (2.5)$$

2.1.2 Exponenciální rozdělení

Exponenciální rozdělení se používá pro popis dobu do vzniku náhodného jevu v Poissonově procesu. Ve spolehlivosti se toto rozdělení nejčastěji používá pro systémy, u nichž dochází k poruchám náhle a náhodně. Parametrem exponenciálního rozdělení je λ – intenzita poruch. Exponenciální rozdělení je také označováno jako rozdělení bez paměti. To znamená, že nezáleží na tom, jestli zařízení bylo v bezporuchovém stavu již v předchozí době. [8]

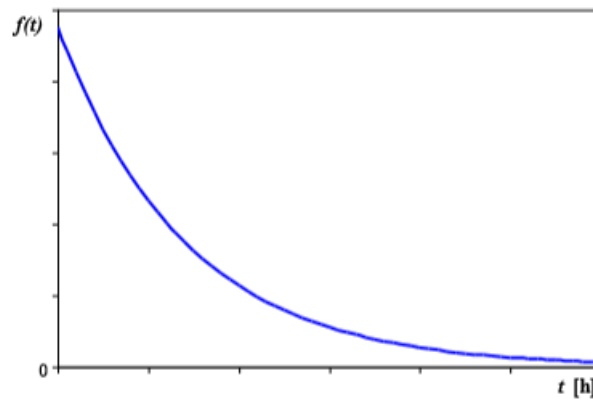
Hustota pravděpodobnosti $f(t)$ má průběh klesající exponenciální funkce a pro výpočet využíváme tento vztah:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.6)$$

Kde:

t – hodnota náhodné veličiny T [h]

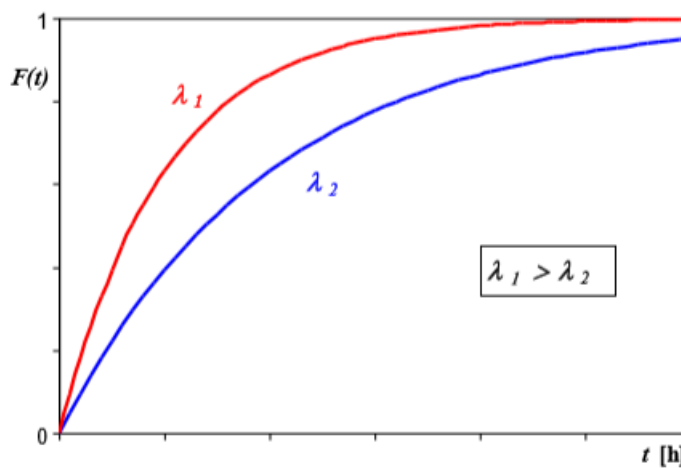
λ – intenzita poruch [h^{-1}]



Obrázek 5 Průběh hustoty pravděpodobnosti exp. Rozdělení [8]

Průběh Distribuční funkce $F(t)$ pro různé hodnoty parametru λ je zobrazen na obrázku 6, a je stanoven vztahem:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.7)$$



Obrázek 6 Průběh distribuční funkce odlišných intenzit poruch [8]

Pravděpodobnost bezporuchového stavu $R(t)$ vyjadřuje následující vztah:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.8)$$

Intenzita poruch exponenciálního rozdělení je konstantní a je rovna hodnotě parametru rozdělení λ . Střední hodnotu $E(t)$ a rozptyl $D(t)$ náhodné veličiny s exponenciálním rozdělením vyjadřují tyto vzorce:

$$E(T) = \frac{1}{\lambda} \quad (2.9)$$

$$D(T) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.10)$$

2.2 Metoda analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA

Metoda FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), tedy Analýza způsobů a důsledků poruch, je strukturovaná, kvalitativní analýza sloužící k identifikaci způsobů poruch systémů, jejich příčin a důsledků. Metoda FMEA je metoda induktivní, která provádí kvalitativní analýzu bezporuchovosti a bezpečnosti systému od nižší k vyšší úrovni členění systému a zkoumá, jakým způsobem mohou objekty na nižší úrovni selhat a jaký důsledek mohou mít tato selhání pro vyšší úroveň systému. [8]

K provedení analýzy metodou FMEA je nutné podrobně vymezit podmínky její realizace a mít k dispozici všechny potřebné vstupní informace, ke kterým patří: [8]

- technický popis systému
- definice rozhraní systému
- funkční členění systému
- definice funkcí systému a jeho prvků apod.

Při vlastní analýze jsou postupně všechny prvky systému (na zvolené nejnižší úrovni) podrobeny systematickému zkoumání, při kterém se realizují především tyto základní kroky: [8]

- identifikace způsobů poruch prvku, jejich důsledků a pravděpodobných příčin
- kvalitativní posouzení významnosti jednotlivých způsobů poruch
- návrh opatření k zamezení vzniku poruch a jejich detekci
- posouzení účinnosti zavedených opatření opětovným provedením analýzy a její vyhodnocení.

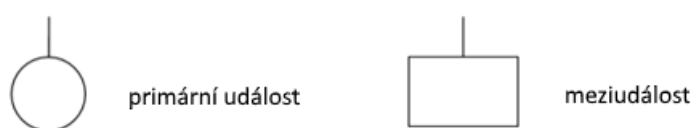
Tento základní rozsah analýzy může být podle potřeby rozšířen o další kroky, v rámci kterých se zjišťují další informace, potřebné pro posouzení spolehlivosti či bezpečnosti systému.

Výstupem FMEA jednotlivých prvků je kvalitativní hodnocení úrovně spolehlivosti a bezpečnosti analyzovaného systému v podobě výčtu všech předpověditelných poruch, problémových míst v konstrukci a technologii a jejich důsledků pro funkci systému. Výsledky by měly mít seřazenou podobu, doplněnou o informace o pravděpodobných příčinách poruch, způsobech jejich identifikace apod. [8]

2.3 Metoda analýzy spolehlivosti FTA

Analýza stromu poruchových stavů FTA (Fault Tree Analysis) je metoda speciálních orientovaných grafů. Strom poruch představuje logický diagram, který znázorňuje logické vztahy mezi potenciální vrcholovou událostí a mezi příčinami vzniku tohoto jevu. Strom FTA se rozvíjí od vrcholové události, která představuje poruchu systému, k dalším jevům nižší úrovně, přičemž se posuzují možné příčiny vzniku poruchového jevu. [8]

Proto konstrukce stromu poruchových stavů probíhá postupným rozvojem příčin nežádoucích událostí. Tedy strom je rozvíjen směrem k nižším úrovním systému, které jsou nazývány meziudálostmi. Rozvoj stromu pokračuje až k primárním událostem, které není možno dále rozvíjet. Tyto události musí být navzájem nezávislé. Grafické znázornění těchto událostí je značeno takto:



Obrázek 7 značení událostí ve FTA [8]

Stromy poruch se tvoří pomocí logických operací, které jsou v grafickém zápisu vyznačeny jako symboly hradel. Tyto hradla jsou na obrázku 8 a jsou popsána takto:

- Konjunkce (hradlo AND) – je logický součin. Výstupní událost nastane v případě, že nastanou všechny vstupní události.

$$T = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

Kde:

T = výstupní událost

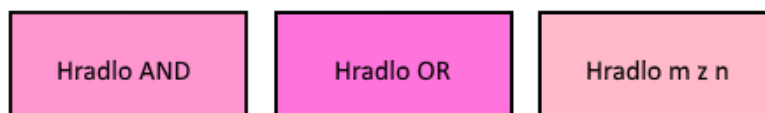
A_i = vstupní události

- Disjunkce (hradlo OR) – představuje logický součet. Výstupní událost nastane v případě, dojde-li alespoň k jedné vstupní události.

$$T = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

- logika „m z n“ (výběrové hradlo) – je výběrovou logikou. Vstupní událost nastane, když nastane současně v libovolné kombinaci alespoň m vstupních událostí z n celkových. Příklad hradla 2 ze 3:

$$T = A_1 \cdot A_2 + A_1 \cdot A_3 + A_2 \cdot A_3 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$



Obrázek 8 značení hradel ve stromě poruch

3. Hodnocení bezporuchovosti trakčního systému

3.1 Specifikace vozidla

V této práci mám za cíl analyzovat bezporuchovost trakční jednotky vozidla od společnosti Siemens. Tato jednotka se skládá ze dvou čelních a dvou vložených vozů. Uspořádání těchto vozů je zobrazeno následujícím blokovým schématem.



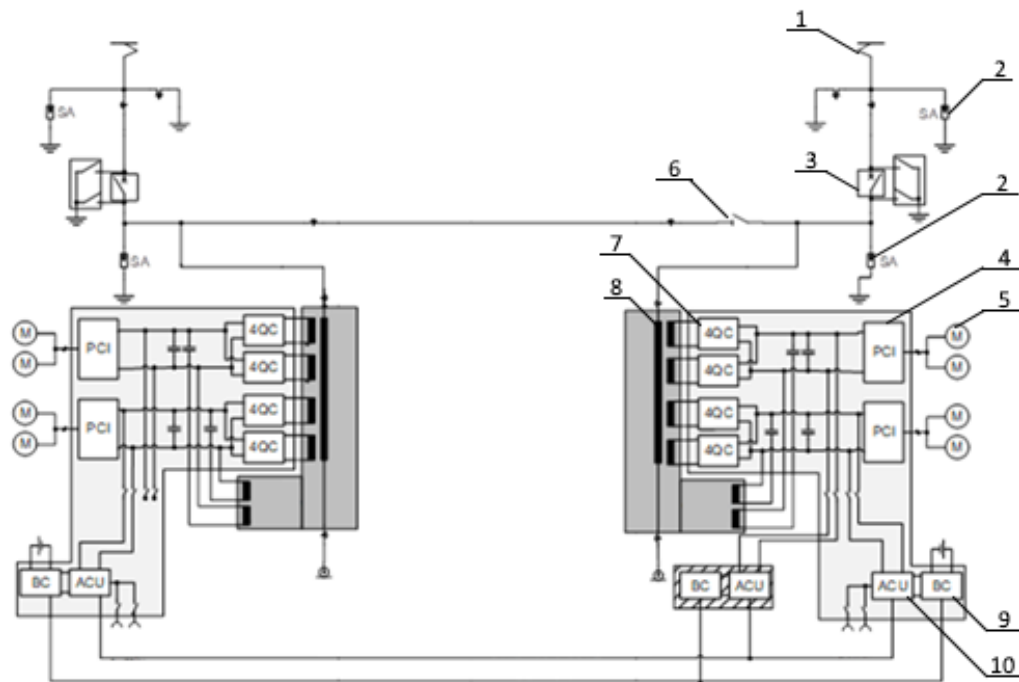
Obrázek 9 Schéma uspořádání vozů

Další parametry k analýze bezporuchovosti jsou zadány zadavatelem. Předpokládaná životnost jednotky je 30 let. Jednotka bude v provozu 6000 hodin ročně při průměrném nasazení 18 hodin denně. Tyto parametry budou sloužit jako základní vstupní údaje pro stanovení počtu poruch za životnost jednotky v metodě FTA.

Tabulka 1 Parametry provozu jednotky

Parametry		
životnost jednotky metra	30	let
roční doba provozu	6000	hodin
denní doba provozu	18	hodin

3.1.2 Trakční schéma



Obrázek 10 Trakční schéma el. jednotky [7]

Zobrazené trakční schéma obsahuje následující komponenty:

1. Sběrač proudu
2. Bleskojistka
3. Hlavní vypínač
4. Trakční měnič
5. Trakční motor
6. Střešní přepínač proudu
7. Čtyř kvadrantový měnič proudu
8. Transformátor
9. Nabíječka baterie
10. Pomocná jednotka měniče

Komponenty a jejich počet, které jsou zahrnuty ve výpočtu FTA jsou následující:

- 2x sběrač proudu
- 2x hlavní vypínač
- 2x transformátor
- 4x trakční měnič
- 8x trakční motor
- 2x chladicí jednotka

Tyto komponenty jsou podrobněji popsány v analýze způsobů a důsledků poruch FMEA.

3.2 Hodnocení spolehlivosti s využitím FMEA

Na základě vyhodnocené spolehlivosti s využitím metody FMEA, která mi byla poskytnuta ve společnosti Siemens, jsem zpracoval potřebné informace k vyhodnocení metody stromu poruch FTA. U jednotlivých komponentů jsem se zaměřil na jejich druhy poruch a četnost těchto poruch. Pomocí druhů poruch jsem stanovoval důsledky poruch, neboli jaký vliv mají tyto poruchy na výkon trakční jednotky. Poruchy vykazovaly částečnou, úplnou nebo žádnou ztrátu pohonu. Poruchy s žádnou ztrátou pohonu nebyly zahrnuty při výpočtu stromu poruch v metodě FTA. Dále bylo potřeba určit intenzitu poruch v rozmezí určitého časového úseku. K tomu nám slouží jednotka FIT, neboli počet poruch za jednu miliardu hodin.

Komponenty pohonné jednotky

V tabulce jsou zobrazeny jednotlivé poruchy daných komponentů a jejich důsledek ovlivňující výkon trakční jednotky. Zvýrazněny jsou komponenty, které budou zvlášť zahrnuty do stromu poruch FTA pro zablokovaný pohon. Vyskytují se zde poruchy úplné ztráty pohonu, částečné ztráty pohonu a poruchy bez okamžitého důsledku snížení výkonu.

Tabulka 2 Spolehlivostní analýza pohonné jednotky [7]

Komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
Trakční motor			
<u>statorové jádro s vinutím</u>	přerušovaný přívod elektrické energie zkrat vinutí tepelné přetížení	úplná ztráta pohonu	300
<u>rotor</u>	poškození rotor je v pohybu	úplná ztráta pohonu	5
	zablokování dvojkolí rotor není v pohybu	úplná ztráta pohonu	5
<u>ložiska</u>	poškození nedostatečným mazáním zablokování dvojkolí	úplná ztráta pohonu	67
	přehřátí Přetížení, vysoké vibrace nedostatečné mazání	snížení trakčního výkonu	123
Spojka			
<u>vnitřní ústrojí</u>	překročení přípustných průhybů	úplná ztráta pohonu	20
	vniknutí cizích předmětů nedostatečné mazání překročení mezní teploty	snížení trakčního výkonu	30
<u>spojovací šrouby</u>	rozbití, přetížení	úplná ztráta pohonu	10
	selhání montáže	snížení trakčního výkonu	15
převodovka			
<u>pastorek hřídele / mezilehlý hřídel</u>	poškození zubů zablokování dvojkolí	úplná ztráta pohonu	2
	opotřebení vysoký hluk a vibrace	snížení trakčního výkonu	10
<u>ozubené kola</u>	poškození zubů selhání náboje zablokování dvojkolí	úplná ztráta pohonu	2
	opotřebení vysoký hluk a vibrace	snížení trakčního výkonu	13
<u>vstupní a mezilehlá hřídel</u>	nedostatečné mazání přetížení celkové poškození	úplná ztráta pohonu	2
	nedostatečné mazání částečné poškození	snížení trakčního výkonu	248
<u>skříň převodovky</u>	koroze praskliny vada odlitku	snížení trakčního výkonu	100
<u>momentová tyč</u>	porucha šroubového spojení selhání	úplná ztráta pohonu	100
<u>labyrintové těsnění</u>	zařízení je netěsné ztráta oleje	žádný okamžitý důsledek	220
<u>gumové a kovové části</u>	selhání materiálu rozbití	úplná ztráta pohonu	200

Komponenty chladicí jednotky

Všechny komponenty chladicí jednotky vykazují snížení trakčního výkonu. Jednotlivé komponenty chladicí jednotky byly sloučeny do podskupin kvůli zjednodušení a přehlednosti analýzy (viz. Tabulka 3). V tabulce vidíme, že výměník tepla vykazuje velmi vysokou četnost poruch.

Tabulka 3 Spolehlivostní analýza chladicí jednotky [7]

komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
<u>potrubí a prvky vodního okruhu</u>	nedostatečné chlazení koroze, netěsnosti, nečistoty v chladicím systému montážní nepřesnosti	snížení trakčního výkonu	1600
<u>potrubí olejového okruhu</u>	netěsnosti, nečistoty v chladicím systému, poruchy při montáži	snížení trakčního výkonu	600
<u>čerpadlo vodního okruhu</u>	poškození ložiska nebo vinutí montážní nepřesnosti	snížení trakčního výkonu	900
<u>výměník tepla</u>	koroze znečištění vzduchových kanálů dlouhé intervaly údržby	snížení trakčního výkonu	10000
<u>ventilátor chladicí jednotky</u>	poškození ložiska nebo vinutí zkrat v motoru ventilátoru montážní nepřesnosti únava materiálu	snížení trakčního výkonu	2500

Komponenty transformátoru

V následující spolehlivostní analýze transformátoru vidíme, že veškeré komponenty kromě jádra, cívky a absorpčního reaktoru vykazují poruchy bez okamžitého důsledku na výkon trakční jednotky. Nejvyšší četnost těchto poruch má chladicí systém. Nevyskytují se zde poruchy úplné ztráty výkonu.

Tabulka 4 Spolehlivostní analýza transformátoru [7]

komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
<u>jádro a cívka</u>	poškození izolace vibrace zkrat přehřátí	snížení trakčního výkonu	1000
<u>vysokonapěťová část</u>	vibrace selhání údržby nebo montáže materiálové vady	snížení trakčního výkonu	944
	pomalý únik izolační kapaliny materiálová vada	žádný okamžitý důsledek	82
<u>nízkonapěťová část</u>	vibrace selhání údržby nebo montáže materiálové vady	snížení trakčního výkonu	33,2
	materiálová vada pomalý únik izolační kapaliny vibrace	žádný okamžitý důsledek	50
<u>chladicí systém transformátoru</u>	mechanické poškození a uvolnění přírub přehřátí kapaliny špatná údržba	snížení trakčního výkonu	616
	ztráta izolační a chladicí kapaliny porucha vzniklá dopadem kamene	žádný okamžitý důsledek	1173
<u>ochrana a monitorovací zařízení</u>	špatná izolace materiálová vada přerušený elektrický vodič mechanická závada	snížení trakčního výkonu	1029
	mechanická závada špatná montáž vada materiálu chyba snímače selhání vlivem stárnutí	žádný okamžitý důsledek	706
<u>absorpční reaktor</u>	selhání součástí	snížení trakčního výkonu	600

Komponenty hlavního vypínače

Komponenty hlavního vypínače jsou nejvíce poruchové z důvodu materiálových a mechanických závad. Pouze elektropneumatické prvky vykazují poruchy, které nemají přímý vliv na výkon vozidla. Komponenty hlavního jističe byly shrnuty kvůli přehlednosti a zjednodušení výpočtu (viz. Tabulka 5).

Tabulka 5 Spolehlivostní analýza hlavního jističe [7]

komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
<u>vakuový vypínač</u>	ztráta vakua materiálová vada ztráta kontaktu	úplná ztráta pohonu	1240
<u>elektropneumatické prvky</u>	mechanická závada ventil neodvzdušňuje neaktivuje se ovládací cívka netěsnost materiálová vada	úplná ztráta pohonu	2650
	mechanická závada ventil neodvzdušňuje	žádný okamžitý důsledek	600
<u>elektronické prvky</u>	vada materiálu špatný zpětný signál mechanická závada materiálová vada	úplná ztráta pohonu	2800

Komponenty trakčního sběrače

Veškeré komponenty trakčního sběrače vykazují poruchu ztráty přívodu el. energie. Komponenty jsou nejvíce poruchové z důvodu únavy materiálu, špatné údržby a vibracím.

Tabulka 6 Spolehlivostní analýza trakčního sběrače [7]

komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
<u>mechanické prvky</u>	únava materiálu špatná údržba vibrace nadměrná zátěž	ztráta přívodu el. Energie	8418
<u>pneumatické prvky</u>	selhání těsnění špatná údržba vibrace únava materiálu UV poškození	ztráta přívodu el. Energie	2095
<u>řídící prvky</u>	nedostatečný přívod vzduchu špatná údržba porucha ventilu, spínače	ztráta přívodu el. Energie	1030

Komponenty trakčního měniče

Poruchy komponentů trakčního měniče vykazují úplnou ztrátu funkce nebo žádný okamžitý důsledek. Lze si všimnout, že komponenty jádro a řídicí jednotky mají velmi vysokou intenzitu poruch.

Tabulka 7 Spolehlivostní analýza trakčního měniče [7]

komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
<u>Jádro trakčního měniče</u>	poškození izolace zkrat přehřátí	ztráta funkce	9850
	vibrace	žádný okamžitý důsledek	150
<u>Ostatní řídicí jednotky</u>	selhání komponentu nebo softwaru	ztráta funkce	11000
<u>Hl. řídicí jednotka</u>	selhání komponentu nebo softwaru	ztráta funkce	5500
<u>Sít'ový stykač</u>	nelze aktivovat porucha kabelu/součásti	ztráta funkce	750
	nezavírá se porucha kabelu/součásti	ztráta funkce	750
<u>Přednabíjecí stykač a odporník</u>	nelze aktivovat porucha kabelu/součásti	ztráta funkce	600
	neotevívá se špatný kontakt	ztráta funkce	600
<u>Ostatní prvky</u>	případný vliv okolního prostředí porucha kabelu/součásti	ztráta funkce	1920
	případný vliv okolního prostředí porucha kabelu/součásti	žádný okamžitý důsledek	130

Brzdový odporník a střešní odpojovač

Komponenty brzdového odporníku a střešního vypínače jsou nejvíce namáhány na únavu materiálu, selhání komponentu a vibrace.

Tabulka 8 Spolehlivostní analýza brzdového odporníku a střešního odpojovače [7]

komponenta	druhy poruch	důsledky poruch	četnost poruchy (FIT)
<u>Brzdový odporník</u>	vibrace selhání komponentu únava materiálu	ztráta funkce	300
<u>Vysokonapěťový střešní odpojovač</u>	vibrace selhání komponentu únava materiálu špatná údržba	ztráta funkce	200

3.3 Analýza bezporuchovosti s využitím FTA

V této práci je cílem vypočítat parametry bezporuchovosti pro jednotlivé funkční režimy a jejich poruchové stavy. Zabýval jsem se tedy stavy jako jsou ztráta 25 % trakčního výkonu, ztráta 50 % trakčního výkonu, ztráta 100 % trakčního výkonu a stavu zablokovaného pohonu.

Analýza bezporuchovosti byla provedena pomocí FTA (stromů poruchových stavů), které byly sestaveny pomocí interního software programu společnosti Siemens.

3.3.1 Ztráta 25 % trakčního výkonu

Při poruše, u které dojde ke ztrátě 25 % trakčního výkonu může vozidlo jezdit dál do konce pracovního dne. Tato porucha musí být neprodleně po ukončení provozu během pracovního dne opravena. Celá trakční jednotka má celkem 8 motorů, proto při ztrátě výkonu 25 % dojde k vypnutí 2 motorů. Poruchy, při kterých dojde ke ztrátě 25 %, jsou následující: porucha jednoho trakčního měniče, porucha brzdového odporu nebo porucha pohonné jednotky. Pro sestavení stromu poruch použiji intenzity poruch FIT jednotlivých komponent ze spolehlivostní analýzy, jejichž přehled je v tabulce (viz. tabulka 9).

Tabulka 9 Spolehlivostní analýza pro ztrátu 25 % trakčního výkonu

Komponenta	četnost poruchy [FIT]
trakční měnič	
jádro trakčního měniče	9850
řídící jednotky tr. měniče	16500
síťový stykač	1500
přednabíjecí stykač a odporník	1200
ostatní prvky tr. měniče	1920
pohonná jednotka	
trakční motor	428
nápravová převodovka	893
zubová spojka	75
brzdový odporník	300

Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav ztráty 25 % trakčního výkonu je 136 248 FIT neboli 136 248 poruch za miliardu hodin. Pro lepší představu jsem toto číslo převedl na počet poruch za životní cyklus jednotky pomocí Poissonova rozdělení.

Nejdříve je potřeba přepočítat intenzitu poruch z jednoty FIT na intenzitu poruch za jednu hodinu. Toho docílíme vydělením výsledné hodnoty intenzity poruch jednou miliardou hodin.

$$\lambda = \frac{FIT}{10^9} = [\text{počet poruch za hodinu}] \quad (3.1)$$

Po dosazení:

$$\lambda = \frac{136248}{10^9} = 1,36248 \cdot 10^{-4} \text{ poruch za hodinu}$$

Dále je potřeba vypočítat počet hodin v provozu, kterých je jednotka schopná docílit za svou životnost. V úvodu praktické části této práce bylo stanoveno, že životnost jednotky je 30 let při ročním využití 6000 hodin (viz. Tabulka 1).

$$\check{Z} = H \cdot R = [\text{hod}] \quad (3.2)$$

Kde:

H = doba ročního provozu metra [hod]

R = počet let v provozu

Po dosazení:

$$\check{Z} = 6000 \cdot 30 = 180\,000 \text{ hodin}$$

Na základě získaných hodnot intenzity poruch za jednu hodinu a počtu hodin v provozu za životnost vozidla lze stanovit, s jakou pravděpodobností nastane jedna, dvě a více poruch. K tomuto výpočtu použijí Poissonovo rozdělení. Vzorec pro výpočet Poissonova rozdělení (viz. vzorec 2.1).

$$p(k) = P(X = k) = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Kde:

λ – intenzita poruch [h^{-1}],

k – počet výskytů sledovaného jevu

t – délka časového intervalu [h]

Po dosazení pro výpočet pravděpodobnosti výskytu jedné poruchy:

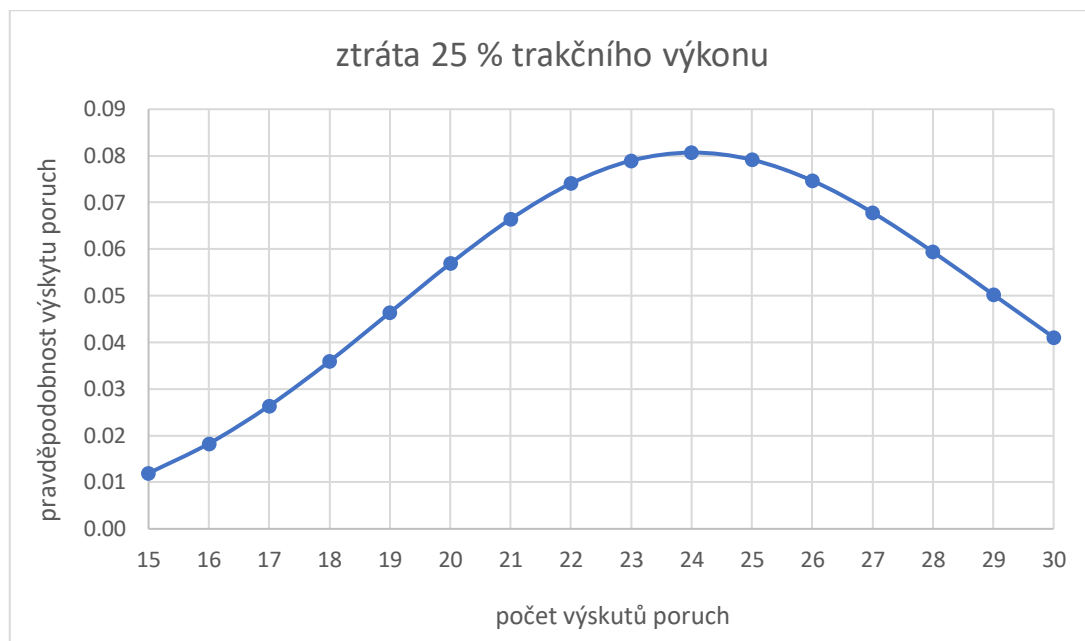
$$p(1) = \frac{(1,36248 \cdot 10^{-4} \cdot 180000)^1}{1!} \cdot e^{-1,36248 \cdot 10^{-4} \cdot 180000} = 5,479 \cdot 10^{-10}$$

Pravděpodobnost výskytu jedné poruchy je velmi nízká. Proto jsem výpočet opakoval pro zjištění pravděpodobnosti výskytu více chyb. Výsledky těchto výpočtů jsou shrnuty v tabulce (viz. Tabulka 10).

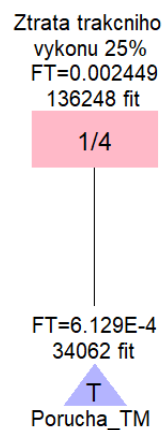
Tabulka 10 Poissonovo rozdělení pro ztrátu 25 % trakčního výkonu

počet výskytů poruch (k)	Pravděpodobnost výskytů poruch P(k)
15	0.0119
16	0.0183
17	0.0264
18	0.0359
19	0.0464
20	0.0569
21	0.0664
22	0.0741
23	0.0790
24	0.0807
25	0.0792
26	0.0747
27	0.0678
28	0.0594
29	0.0502
30	0.0411

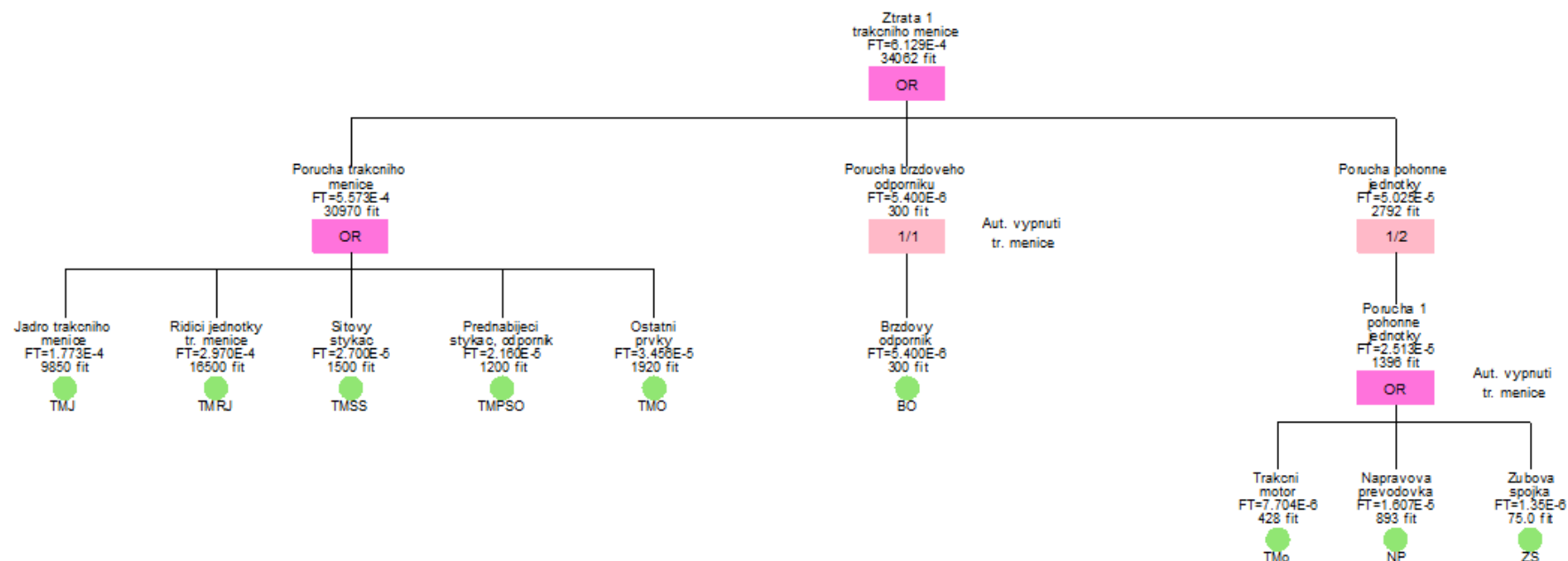
Pravděpodobnosti výskytu jedné až čtrnácti poruch byly velmi nízké, proto nejsou v tabulce zahrnuty. Po přepočtu lze říci, že s nejvyšší pravděpodobností nastane poruchový stav ztráty 25 % trakčního výkonu přibližně 24krát po dobu životnosti vozidla. Pro lepší představu jsem tyto hodnoty zobrazil pomocí grafu.



Obrázek 11 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro ztrátu 25 % trakčního výkonu



Obrázek 12 FTA pro poruchový stav ztráty 25 % trakčního výkonu



Obrázek 13 Podstrom FTA pro poruchový stav ztráty 1 trakčního měniče

3.3.2 Ztráta 50 % trakčního výkonu

V tomto případě není trakční výkon dostatečný pro adekvátní jízdu, elektro-dynamické brzdění nebo vlak není schopen dalšího provozu z mechanických důvodů. V příští stanici musí být vlak okamžitě ze služby vyloučen.

Ztráta 50 % trakčního výkonu vlaku může být způsobena následujícími událostmi:

a) Porucha součástí týkajících se jednoho trakčního okruhu (jedno motorové vozidlo):

- porucha jednoho ze dvou jističů;
- porucha jednoho ze dvou hlavních vypínačů napájení;

b) Dvě poruchy (každá s 25% ztrátou trakce), ke kterým dochází během jedné denní pracovní směny. Jakákoli kombinace dvou poruch se ztrátou 25 % výkonu ve vlaku má za následek ztrátu 50 % trakčního výkonu. Jednotlivé způsoby poruch byly uvedeny výše.

c) Jiné poruchy představující vážné mechanické poruchy trakčního motoru nebo převodovky.

Ve stromě poruchových stavů pro tento případ využíváme převážně hradla typu OR a „m z n“, pouze u události ztráty přívodu el. energie je použito hradlo AND. V FTA byly kvůli lepší orientaci vytvořeny podstromy, ve kterých se nachází zbylé prvky chladicího okruhu, hlavního transformátoru a prvky pro napájení elektrické energie. Podstrom pro poruchový stav ztráty 1 trakčního měniče je znázorněn u výpočtu 25 % ztráty trakce (viz. Obrázek 13).

Tabulka 11 Spolehlivostní analýza pro ztrátu 50 % trakčního výkonu

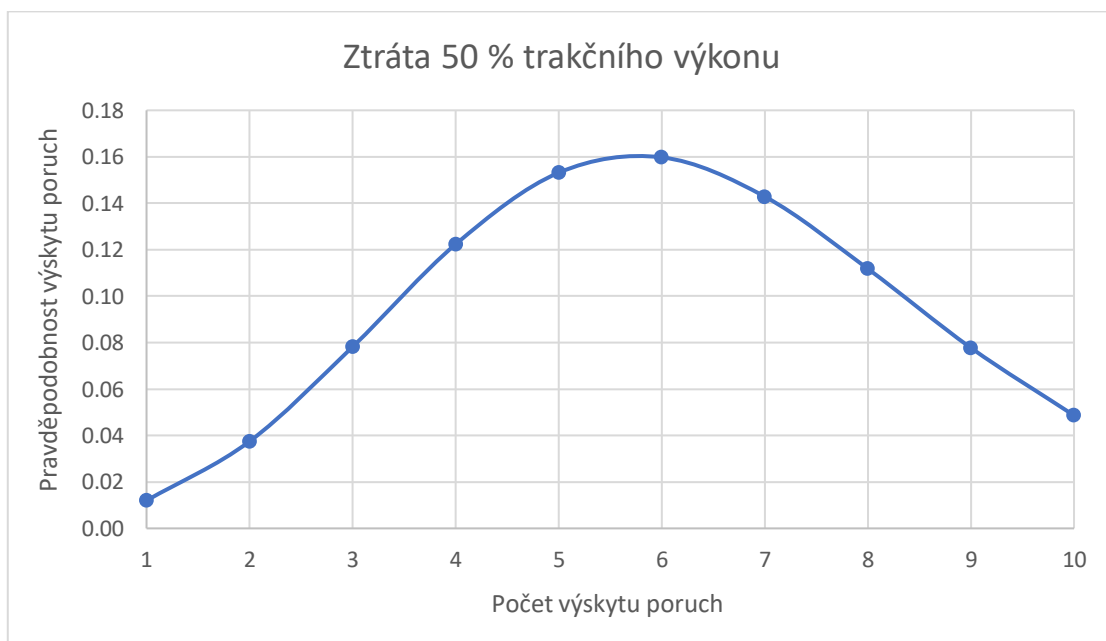
Komponenta	četnost poruchy [FIT]
trakční měnič	
jádro trakčního měniče	9850
řídící jednotky tr. měniče	16500
síťový stykač	1500
přednabíjecí stykač a odporník	1200
ostatní prvky tr. měniče	1920
Transformátor	
jádro a cívka	1000
vysokonapěťová část	944
nízkonapěťová část	33,2
chladicí systém transformátoru	616
ochrana a monitorovací zařízení	1029
absorpční reaktor	600
Chladicí jednotka	
potrubí a prvky vodního okruhu	1600
potrubí olejového okruhu	600
čerpadlo vodního okruhu	900
výměník tepla	10000
ventilátor chladicí jednotky	2500
Hlavní vypínač	
vykuový vypínač	1240
elektropneumatické prvky	2650
elektronické prvky	2800
Sběrač	
mechanické prvky	8418
pneumatické prvky	2095
řídící prvky	1030

Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav ztráty 50 % trakčního výkonu je 34 771 FIT. I zde jsem výslednou hodnotu přepočítal na počet poruch za životnost vozidla pomocí Poissonova rozdělení.

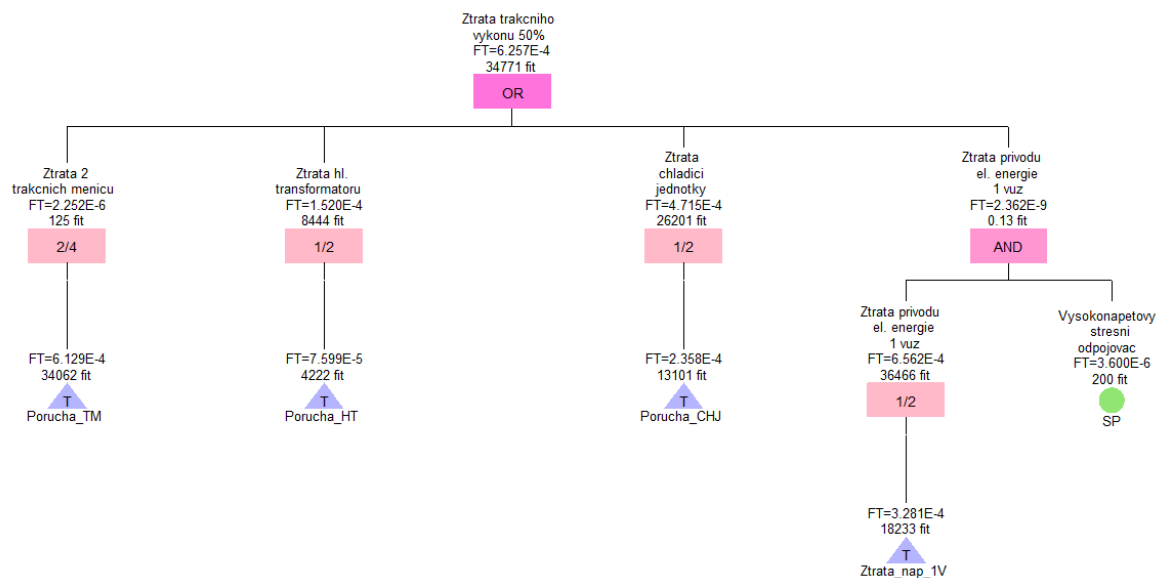
Tabulka 12 Poissonovo rozdělení pro ztrátu 50 % trakčního výkonu

počet výskytů poruch (k)	Pravděpodobnost výskytů poruch P(k)
1	0.0120
2	0.0375
3	0.0782
4	0.1223
5	0.1531
6	0.1598
7	0.1428
8	0.1117
9	0.0777
10	0.0486

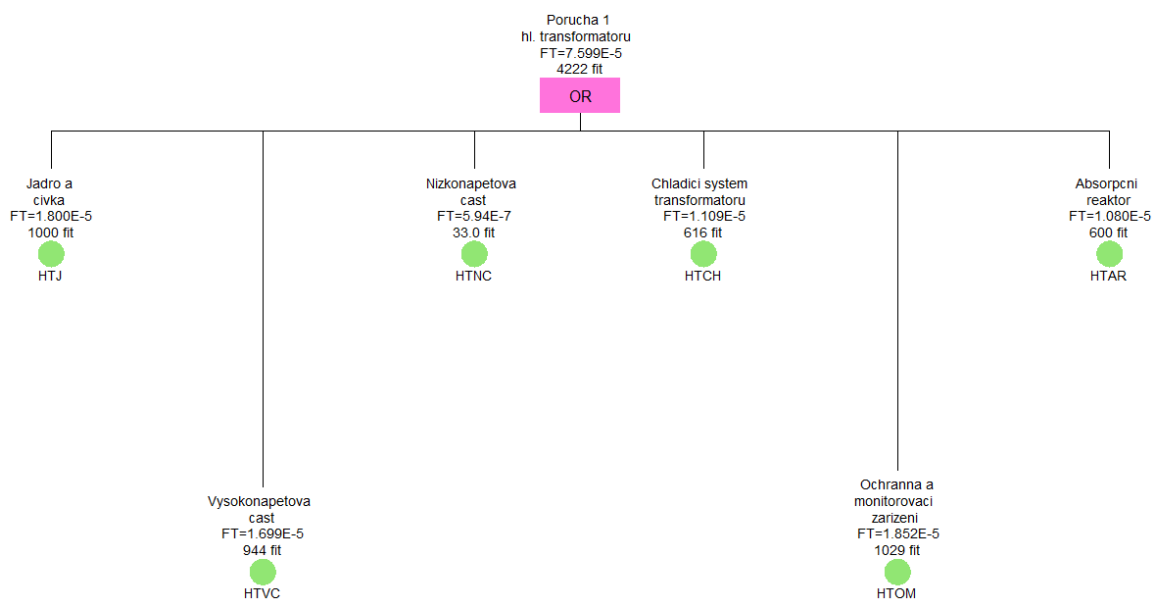
Na základě získaných hodnot lze říci, že s nejvyšší pravděpodobností nastane poruchový stav ztráty 50 % trakčního výkonu přibližně 6krát po dobu životnosti vozidla. I zde jsem pro lepší představu tyto hodnoty zobrazil pomocí grafu na obrázku (viz. Obrázek 14).



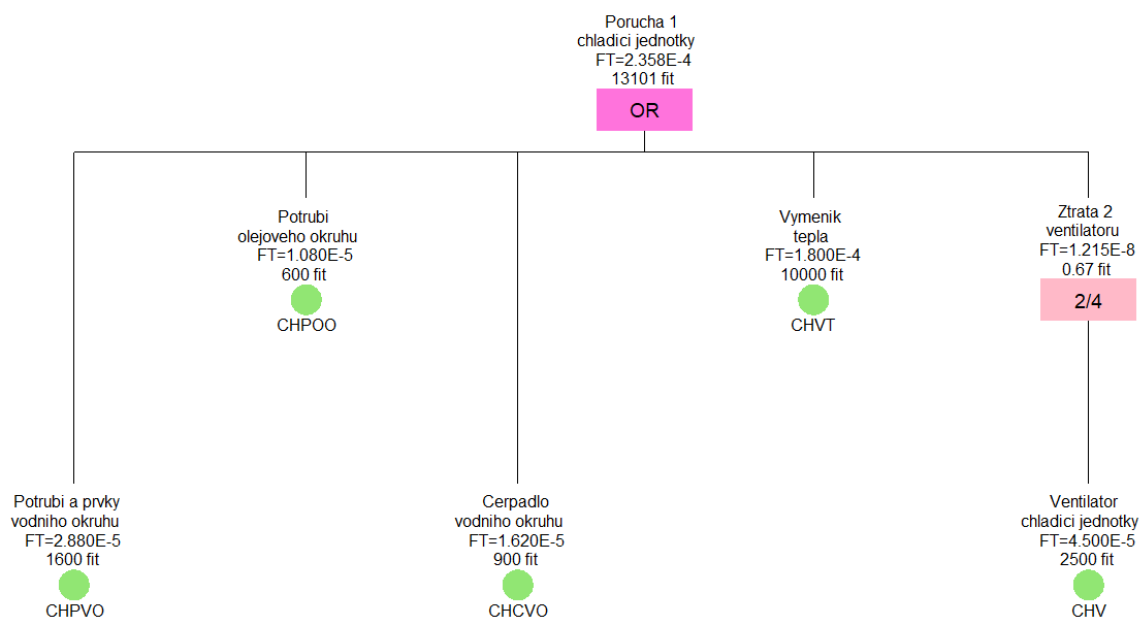
Obrázek 14 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro ztrátu 50 % trakčního výkonu



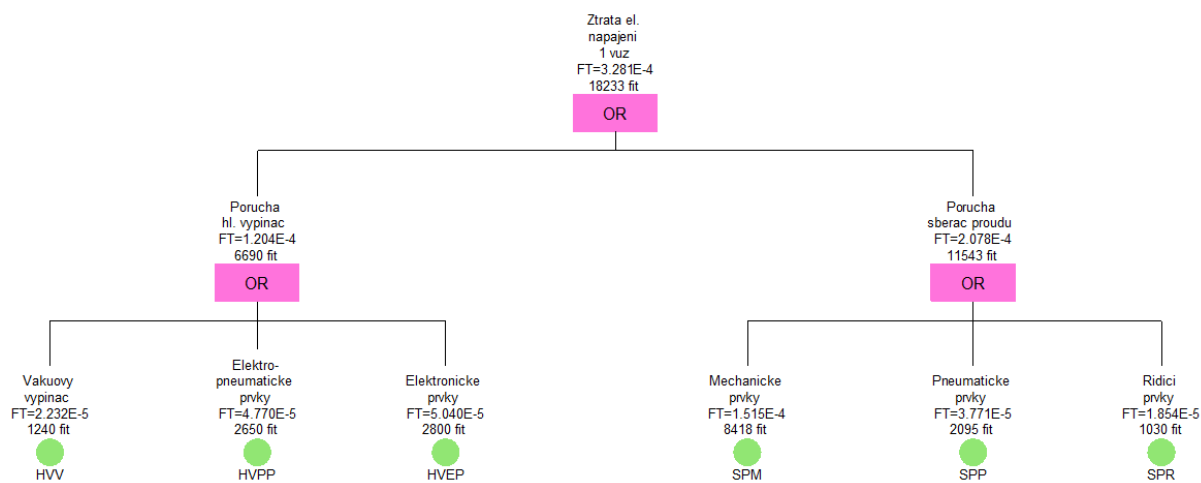
Obrázek 15 FTA pro poruchový stav ztráty 50 % trakčního výkonu



Obrázek 16 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty funkce hl. transformátoru



Obrázek 17 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty chlazení



Obrázek 18 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty el. napájení jednoho vozu

3.3.3 Ztráta 100 % trakčního výkonu

V tomto případě musí být vlak ze stanice nebo trati vytažen vysunutím pomocí záchranného vlaku. Celková ztráta trakce za 18hodinovou směnu je téměř nepravděpodobná. Jelikož při výskytu poruchy 50% ztráty trakčního výkonu musí být vlak ze služby vyřazen.

Ve výpočtu jsou použity podstromy ztráty chlazení, ztráty hlavního transformátoru a ztráty přívodu el. energie pro 1 hnací vůz. Tyto stromy poruch společně s tabulkou vyhodnocení spolehlivostní analýzy jsou zobrazeny v předchozím výpočtu ztráty 50 % výkonu.

Hodnota intenzity poruch pro poruchový stav ztráty 100 % trakčního výkonu je 11,3 FIT.

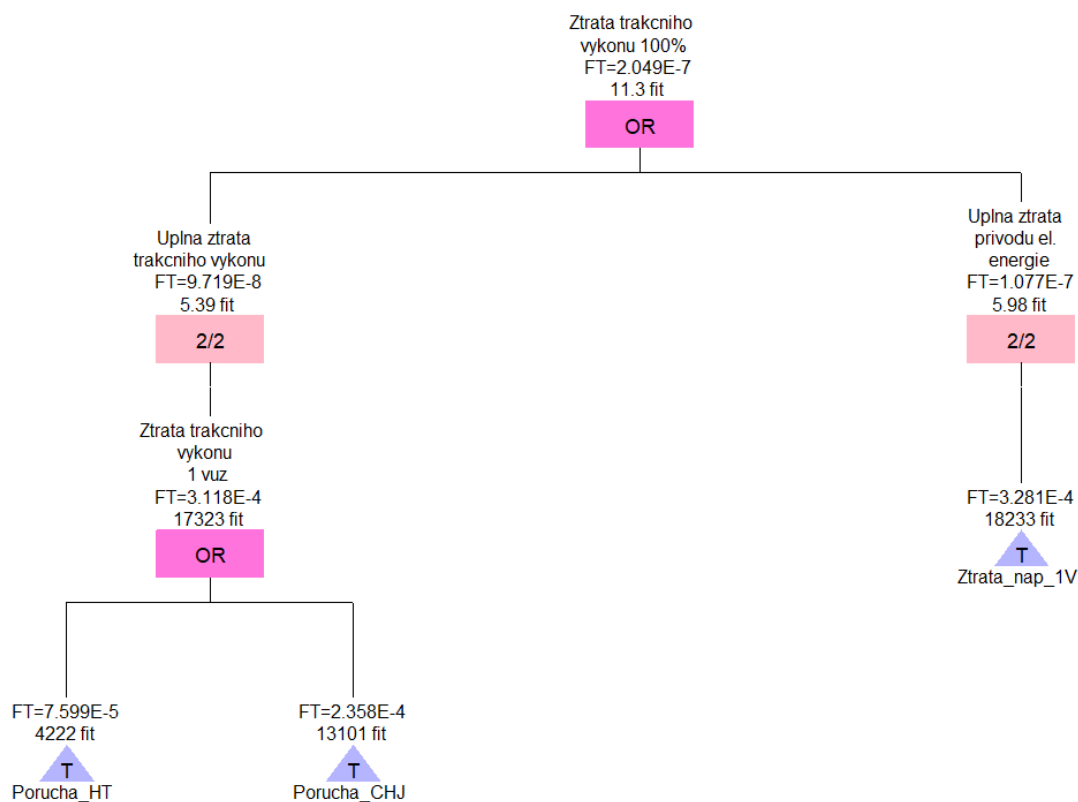
Tabulka 13 Poissonovo rozdělení pro ztrátu 100 % trakčního výkonu

počet výskytů poruch (k)	Pravděpodobnost výskytů poruch P(k)
1	2.03E-03
2	2.06E-06
3	1.40E-09
4	7.12E-13
5	2.90E-16

Tato porucha nastane během životnosti celé jednotky maximálně jednou s velmi nízkou pravděpodobností. Hodnoty jsou zde také zobrazeny pomocí grafu na obrázku (viz Obrázek 19).



Obrázek 19 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro ztrátu 100 % trakčního výkonu



Obrázek 20 FTA pro poruchový stav ztráty 100 % trakčního výkonu

3.3.4 Poruchový stav zablokovaného pohonu

K této poruše dojde v případě, že se zablokuje pohon jedno z celkových osmi hnacích dvojkolí. Proto k tomuto výpočtu používáme hradlo „m z n“. Poruchový stav nastane v případě zablokování trakčního motoru nebo nápravové převodovky.

Tabulka 14 Spolehlivostní analýza pro zablokovaný pohon

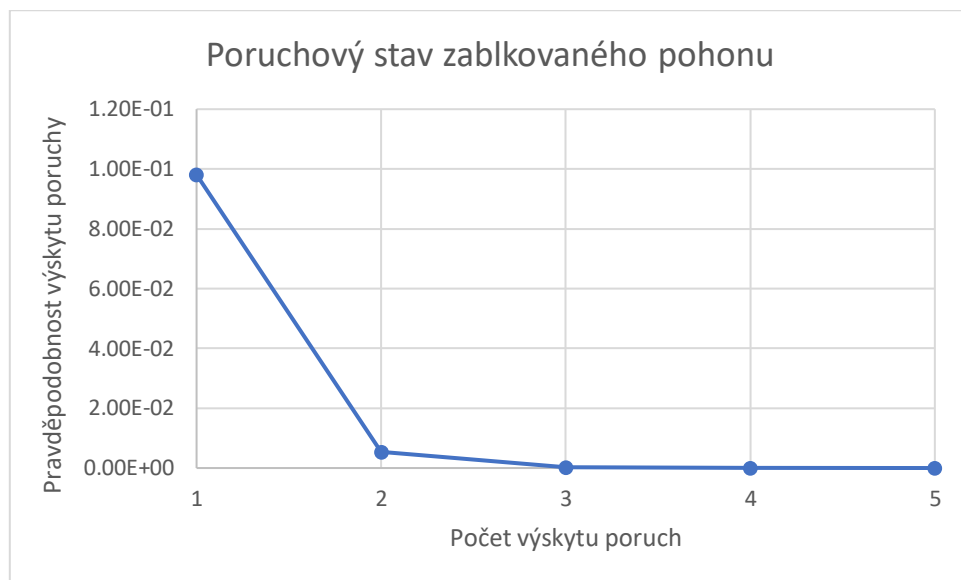
Komponenta	četnost poruchy [FIT]
Zablokovaný motor	72
Zablokovaná převodovka	4

Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav zablokovaného dvojkolí je 608 FIT.

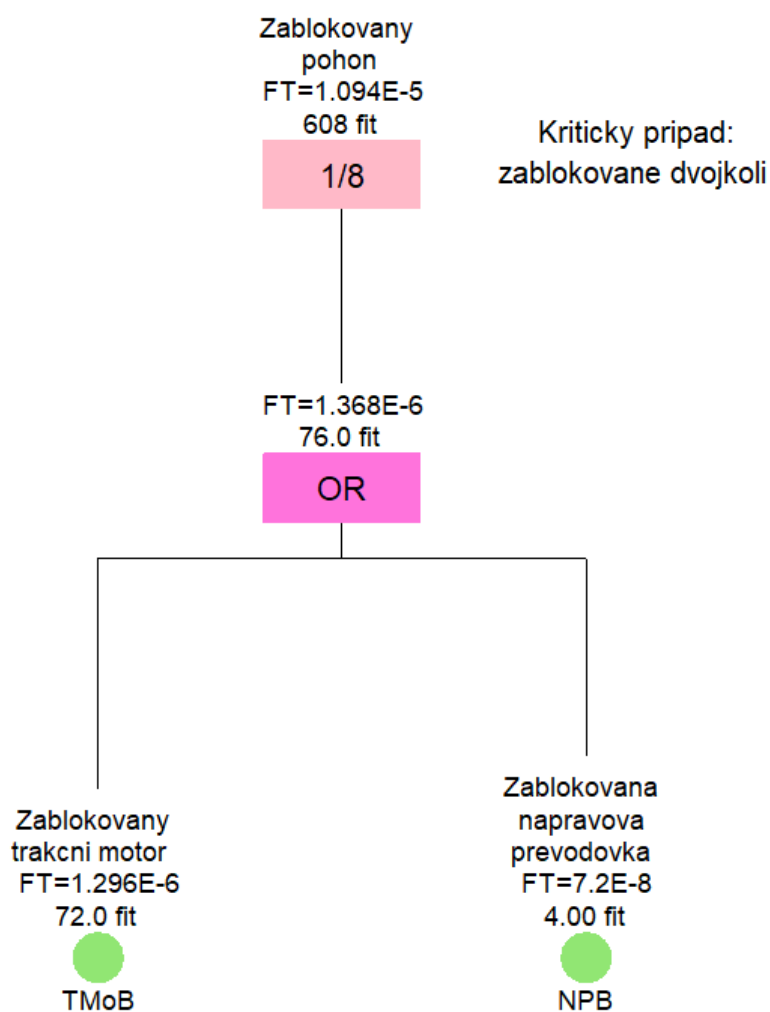
Tabulka 15 Poissonovo rozdělení pro zablokovaný pohon

počet výskytů poruch (k)	Pravděpodobnost výskytů poruch P(k)
1	9.81E-02
2	5.37E-03
3	1.96E-04
4	5.36E-06
5	1.17E-07

K této poruše dojde s nejvyšší pravděpodobností pouze jednou za životnost trakční jednotky. Vypočtené hodnoty jsou znázorněny pomocí grafu na obrázku (viz. Obrázek 21).



Obrázek 21 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro zablokovaný pohon



Obrázek 22 FTA pro poruchový stav zablokovaného pohonu

4. Závěr

Cílem této práce byla kvantitativní a kvalitativní analýza spolehlivosti trakčního systému zadané elektrické trakční jednotky společnosti Siemens.

Analýza FMEA byla zpracována v kapitole 3.2. Výpočty analýzy FTA byly zaznamenány v kapitole 3.3. Po zpracování získaných hodnot analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA a analýzy stromu poruchových stavů FTA byly výsledky jednotlivých poruchových stavů shrnuty v tabulce (viz. Tabulka 16). Z této tabulky lze vyčíst, že s rostoucí ztrátou trakčního výkonu klesá pravděpodobnost výskytu poruchy trakční jednotky. U poruchového stavu ztráty 100 % trakčního výkonu je pravděpodobnost výskytu této poruchy velmi malá, protože jednotka je vyřazena z provozu už při ztrátě 50 % trakčního výkonu.

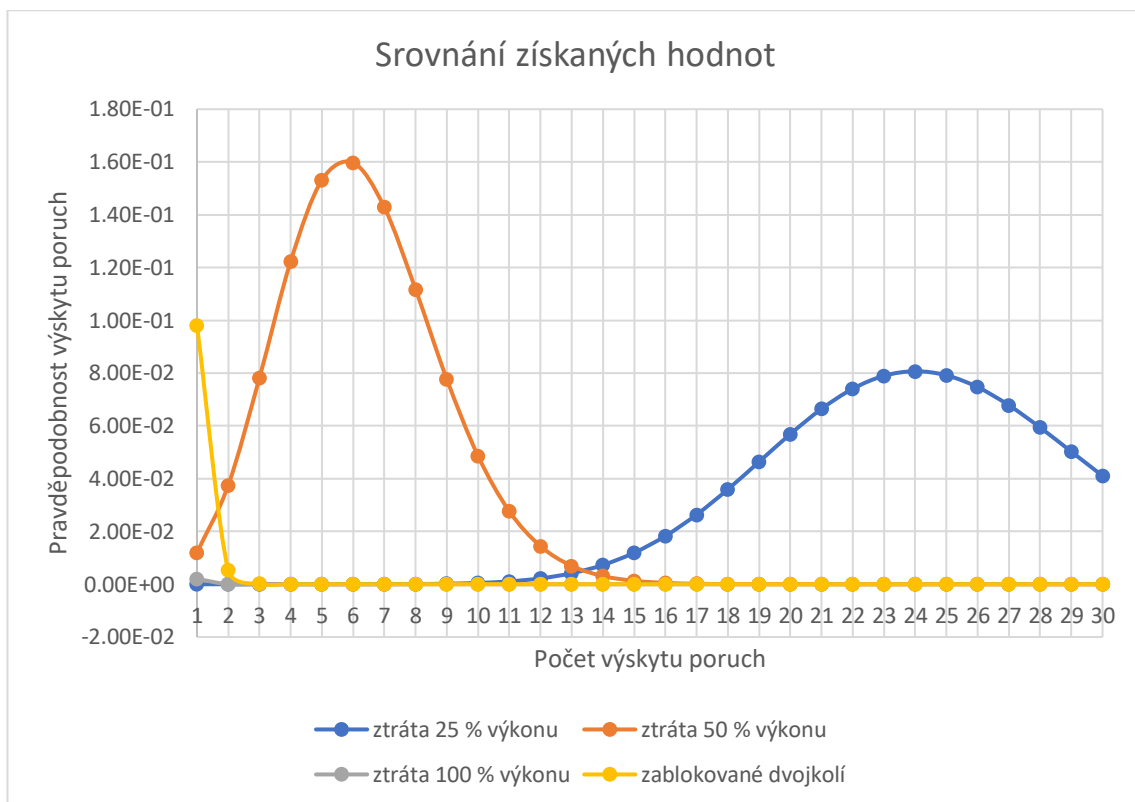
Tabulka 16 Přehled získaných hodnot

Poruchový stav	Intenzita poruch [FIT]	Pravděpodobný počet poruch za živostnost trakční jednotky dle Poissonova rozdělení
Ztráta 25 % trakčního výkonu	136 248	24
Ztráta 50 % trakčního výkonu	34 771	6
Ztráta 100 % trakčního výkonu	11,3	1
Zablokovaný pohon	608	1

Pomocí Poissonova rozdělení jsem spočítal pravděpodobnost výskytu poruch od jedné do třiceti pro 25 %, 50 %, 100 % ztráty výkonu a zablokované dvojkolí. Vypočtené hodnoty byly zahrnuty v tabulce (viz. Tabulka 17). Tyto hodnoty jsem pro lepší přehlednost znázornil pomocí grafu na obrázku (viz. Obrázek 23).

Tabulka 17 Získané hodnoty Poissonova rozdělí

Počet výskytů poruch (k)	Ztráta 25 % trakčního výkonu	Ztráta 50 % trakčního výkonu	Ztráta 100 % trakčního výkonu	Zablokované dvojkolí
1	5.48E-10	1.20E-02	2.03E-03	9.81E-02
2	6.72E-09	3.75E-02	2.06E-06	5.37E-03
3	5.49E-08	7.82E-02	1.40E-09	1.96E-04
4	3.37E-07	1.22E-01	7.12E-13	5.36E-06
5	1.65E-06	1.53E-01	2.90E-16	1.17E-07
6	6.75E-06	1.60E-01	9.81E-20	2.14E-09
7	2.37E-05	1.43E-01	2.85E-23	3.34E-11
8	7.25E-05	1.12E-01	7.25E-27	4.57E-13
9	1.98E-04	7.77E-02	1.64E-30	5.56E-15
10	4.85E-04	4.86E-02	3.33E-34	6.09E-17
11	1.08E-03	2.77E-02	6.16E-38	6.06E-19
12	2.21E-03	1.44E-02	1.04E-41	5.52E-21
13	4.17E-03	6.95E-03	1.63E-45	4.65E-23
14	7.30E-03	3.11E-03	2.37E-49	3.64E-25
15	1.19E-02	1.30E-03	3.22E-53	2.65E-27
16	1.83E-02	5.07E-04	4.09E-57	1.81E-29
17	2.64E-02	1.87E-04	4.90E-61	1.17E-31
18	3.59E-02	6.49E-05	5.53E-65	7.10E-34
19	4.64E-02	2.14E-05	5.93E-69	4.09E-36
20	5.69E-02	6.69E-06	6.03E-73	2.24E-38
21	6.64E-02	1.99E-06	5.84E-77	1.17E-40
22	7.41E-02	5.67E-07	5.40E-81	5.80E-43
23	7.90E-02	1.54E-07	4.77E-85	2.76E-45
24	8.07E-02	4.03E-08	4.04E-89	1.26E-47
25	7.92E-02	1.01E-08	3.29E-93	5.51E-50
26	7.47E-02	2.43E-09	2.57E-97	2.32E-52
27	6.78E-02	5.62E-10	1.94E-101	9.40E-55
28	5.94E-02	1.26E-10	1.41E-105	3.68E-57
29	5.02E-02	2.71E-11	9.88E-110	1.39E-59
30	4.11E-02	5.66E-12	6.70E-114	5.06E-62



Obrázek 23 Srovnání získaných hodnot Poissonova rozdělení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Famfulíkovi, Ph.D. za jeho rady, nápady a připomínky, které byly přínosem pro vypracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Radkovi Krzyžánkovi, Ph.D. za poskytnuté materiály k práci, odborné konzultace a pomoc při řešení problémů.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Regionální jednotka Desiro HC od výrobce Siemens s.r.o. [2].....	12
Obrázek 2 užší pojetí spolehlivosti [8]	15
Obrázek 3 pravděpodobnostní funkce pro odlišné hodnoty [8]	16
Obrázek 4 Distribuční funkce pro různé hodnoty [8]	17
Obrázek 5 Průběh hustoty pravděpodobnosti exp. Rozdělení [8]	18
Obrázek 6 Průběh distribuční funkce odlišných intenzit poruch [8]	18
Obrázek 7 značení událostí ve FTA [8]	20
Obrázek 8 značení hradel ve stromě poruch	21
Obrázek 9 Schéma uspořádání vozů	21
Obrázek 10 Trakční schéma el. jednotky [7].....	22
Obrázek 11 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro ztrátu 25 % tr. výkonu	32
Obrázek 12 FTA pro poruchový stav ztráty 25 % trakčního výkonu	32
Obrázek 13 Podstrom FTA pro poruchový stav ztráty 1 trakčního měniče	33
Obrázek 14 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro ztrátu 50 % tr. výkonu	36
Obrázek 15 FTA pro poruchový stav ztráty 50 % trakčního výkonu	37
Obrázek 16 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty funkce hl. transformátoru	37
Obrázek 17 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty chlazení.....	38
Obrázek 18 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty el. napájení jednoho vozu	38
Obrázek 19 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro ztrátu 100 % tr. výkonu	40
Obrázek 20 FTA pro poruchový stav ztráty 100 % trakčního výkonu	40
Obrázek 21 Pravděpodobnost výskytu počtu poruch pro zablokovaný pohon	42
Obrázek 22 FTA pro poruchový stav zablokovaného pohonu	42
Obrázek 23 Srovnání získaných hodnot Poissonova rozdělení	45

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 Parametry provozu jednotky	22
Tabulka 2 Spolehlivostní analýza pohonné jednotky [7].....	24
Tabulka 3 Spolehlivostní analýza chladicí jednotky [7]	25
Tabulka 4 Spolehlivostní analýza transformátoru [7].....	26
Tabulka 5 Spolehlivostní analýza hlavního jističe [7]	27
Tabulka 6 Spolehlivostní analýza trakčního sběrače [7].....	27
Tabulka 7 Spolehlivostní analýza trakčního měniče [7]	28
Tabulka 8 Spolehlivostní analýza brzdového odporu a střešního odpojovače [7] ..	28
Tabulka 9 Spolehlivostní analýza pro ztrátu 25 % trakčního výkonu	29
Tabulka 10 Poissonovo rozdělení pro ztrátu 25 % trakčního výkonu	31
Tabulka 11 Spolehlivostní analýza pro ztrátu 50 % trakčního výkonu	35
Tabulka 12 Poissonovo rozdělení pro ztrátu 50 % trakčního výkonu	36
Tabulka 13 Poissonovo rozdělení pro ztrátu 100 % trakčního výkonu	39
Tabulka 14 Spolehlivostní analýza pro zablokovaný pohon.....	41
Tabulka 15 Poissonovo rozdělení pro zablokovaný pohon.....	41
Tabulka 16 Přehled získaných hodnot	43
Tabulka 17 Získané hodnoty Poissonova rozdělení	44

Seznam použité literatury

1. ŠIROKÝ, J., J. MULLER, S. ZAPLETAL. Stavba železničních kolejových vozidel. [online], [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: https://issuu.com/michdor/docs/m10_text
2. Siemens, Ingenuity for life. Commuter and regional trains from Siemens, [online], [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/products/mobility/rail-solutions/rolling-stock/commuter-and-regional-trains.html>
3. Wikipedie: otevřená encyklopedie. Vysokorychlostní vlak [online], [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vysokorychlostn%C3%AD_vlak
4. Pavlíček, J. Educon Multimedia Supported Education. Úvod do elektrické trakce, [online], [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015013101>
5. Král, J. a kol. Trakční vozidla závislá. 1. vyd. Praha: 1972, č.j. 15830/72-212.
6. Švestka, D. Atlas lokomotiv [online], [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-transformatory.html>
7. Podle ústního sdělení Ing. Radka Krzyžánka Ph.D. (zaměstnanec Siemens s.r.o. Mobility, 28. října 150/2663 Ostrava) dne 12. března 2019
8. FAMFULÍK, Jan, Vladimír HRANOŠ, Radek KRZYŽANEK a Zuzana GALVASOVÁ. Spolehlivost pozemní dopravy [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava Univerzita Pardubice, 2013 [cit. 2019-02-20]. ISBN 978-80-248-3266. Dostupné z: https://issuu.com/michdor/docs/m11_text